Seria: MECHANIKA z. 66

1978

Czesław JODŁOWSKI

#### RECHERCHE EXPÉRIMENTALE DES VITESSES MINIMALES DE TRANSPORT DANS UN CONDUIT VERTICAL ASCENDANT

La recherche porte sur l'étude des valeurs optimales de la vitesse de transport et de la concentration correspondant aux pertes de pression minimales, dans un conduit vertical ascendant.

La vitesse des particules solides a été mesurée à l'aide, d'une part, de prises de vues réalisées avec une caméra et d'autre part, de traceurs radio-actifs. La détermination de la concentration spatiale moyenne dans une section du conduit a été effectuée au moyen d'un dispositif basé sur l'atténuation du rayonnement émis par une source  $\beta$ .

A partir des équations générales et des mesures expérimentales on détermine le coefficient de traînée moyen des particules, les coefficients de frottement du gaz et des particules et la pression hydro::tatique, ainsi que l'influence des différents paramètres sans dimension entrant en jeu dans un écoulement turbulent biphasique gaz-solide.

#### Notations

o	-	concentration spatiale moyenne dans une section
		droite du conduit.
0	-	concentration volumique moyenne locale,
C <sub>D</sub>	-	coefficient de trainée moyen des particules,
d	-	diamètre moyen des particules solides,
D	_	diamètre du conduit de transport,
D <sub>H</sub>	-	diametre hydraulique de la section = $\frac{4S}{X}$ ,
f	-	nombre de Froude,
g	-	accélération de la pesanteur,
P	-	pression moyenne mesurée en un point du périme-
		tre de conduit,
q_	-	débit masse de particules,
ag	-	débit masse de gaz,

a	_	rapport des débits masse = -
		qg
q <sub>vs</sub>	-	debit volume de particules,
d vg	-	debit volume de gaz,
۹ <sub>v</sub>	-	rapport des débits volume = $\frac{q}{q}$
R	-	nombre de Reynolds,
S	-	section droite du conduit de transport,
d		élément de surface de S,
υ	-	projection de la vitesse du solide sur la direc-
1		tion orientée des génératrices du conduit,
U,	-	projection de la vitesse du gaz sur la direction
D		orientée des génératrices du conduit,
u <sub>s</sub>	_	vitesse débitante des particules solides,
น	-	vitesse débitante du gaz,
w .	_	vitesse de chute d'une particule solide dans le
		fluide immobile,
x	_	périmètre de la section droite du conduit de tran-
		sport,
x	-	absoisse d'un point à l'origine amont du conduit
		dont les génératrices sont orientées dans le sens
		de l'écoulement,
A_	_	coefficient de perte de charge du gaz,
1	-	coefficient de frottement des particules (ou de
-		perte de quantité de mouvement par chocs sur les
		parois),
Agy	-	coefficient de frottement total pour le gaz et les
0		particules solides dans un conduit vertical,
es.	-	masse volumique des particules,
Q <sub>R</sub>	-	masse volumique du gaz,
μ <sub>g</sub>	-	coefficient de viscosité dynamique du gaz,
		Indices: f pour un fluide,
		g pour le gaz,
		s pour les particules solides.

### 1. Introduction

Le calcul d'une installation de transport pneumatique consiste essentiellement en une détermination du débit de gaz à mettre en jeu et de la pression de fonctionnement, en fonction du diamètre du conduit, de la longeur du circuit et du débit matière à réaliser.

Il faut remarquer que plus la vitesse de transport retenue est faible, plus la puissance installée est réduite, et moins les dimensions du matériel nécessaire sont importantes.

L'étude des vitesses de transport est donc d'un intérêt capital car elle permet d'aboutir non seulement à une réduction de l'énergie consommée mais également à un abaissement des coûts des installations, de leux exploitation et de leur entretien.

La présente recherche porte sur l'étude des valeurs optimales de la vitesse de transport et de la concentration correspondant aux pertes de pression minimales d'un écoulement turbulent biphasique dans un conduit cylindrique vertical ascendant.

Les travaux ont été menés en s'appuyant sur l'étude du Professeur A. Fortier relative à l'écoulement turbulent stationnaire biphasique fluide-solide dans un tube cylindrique, à forte concentration massique (Réf. bibl. I et II).

Cette recherche a été réalisée dans le cadre d'une action concertée de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Elle a été effectué en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique Expérimentale des Fluides à Orsay et la participation de la Section d'Application de la Radio-activité du C.E.A. à Saclay, pour la mise au point de certains dispositifs de mesure.

# 2. <u>Application des équations de conservation a l'écoule-</u> mentstationnaire dans un conduit cylindrique

En introduisant les relations de définition établies par A. Fortier pour le cas général (voir annexe), les équations de conservation de la quantité de mouvement s'écrivent:

$$\frac{d\beta_{s} \circ \rho_{s} u_{s}^{2}}{dx} = \circ C_{D f} \frac{(u_{f} - u_{s})^{2}}{2} \frac{3}{2d} - \beta_{ps} \circ \frac{d\bar{p}}{dx}$$

$$+ \rho_{s} \cos\theta g \circ - \circ \frac{\Lambda_{s}}{\bar{D}_{H}} \rho_{s} \frac{u_{s}^{2}}{2}$$
(10)

$$\frac{d \beta_{f}(1-o) \rho_{f} u_{f}^{2}}{dx} = -o C_{D} \rho_{f} \frac{(u_{f} - u_{g})^{2}}{2} \frac{3}{2d} - (11)$$

$$\beta_{pf}(1-o) \frac{d\bar{p}}{dx} + \rho_{f} \cos\theta_{g}(1-o) - (1-o) \frac{\Lambda_{f}}{D_{H}} \rho_{f} \frac{u_{f}^{2}}{2}$$

où

 $\theta$  désigne l'angle des génératrices orientées dans lu sens de l'écoulement avec la verticale orientée de haut en bas,

 $\beta_s$  et  $\beta_f$  sont des coefficients de quantité de mouvement.

 $\beta_{ps}$  et  $\beta_{pf}$  sont des coefficients de répartition de pression.

Pour des conduits de forme géométrique donnée, circulaire de diamètre D, par exemple, de nature de paroi donnée, pour des particules de diamètre moyen d données, et pour une structure donnée de l'écoulement à l'origine amont, les nombres sans dimension  $\beta_s$ ,  $\beta_f$ ,  $\beta_{ps}$ ,  $\beta_{pf}$ ,  $\Lambda_f$ ,  $\Lambda_s$ ,  $C_D$  sont des fonctions d'un nombre de Reynolds  $R_e = u_{f_o} \frac{D}{o}$ , d'un nombre de Froude  $F_{r_o} = \frac{u_{f_o}}{\sqrt{g}}$ ,  $de \frac{Q_s}{Q_f}$ ,  $de \frac{d}{D}$ ,  $de \frac{x}{D}$ ,  $de \frac{q_s}{q_f}$  et  $de \theta$ . L'indice 0 correspond à une section où la vitesse débitante, la masse volumique et la viscosité cinématique du fluide sont respectivement  $u_f$ ,  $\rho_f$  et  $\gamma_o$ .

Dans un conduit vertical ( $\theta = \pi$ ) la pesanteur est sans influence sur la répartition des concentrations dans une section droite du tube qui est horizontale.

Cette répartition s'éloigne peu de la répartition uniforme si l'on se trouve en dehors de la zone située immédiatement à l'aval du coude, et l'hypothèse

$$\beta_{\rm s} = \beta_{\rm f} = \beta_{\rm ps} = \beta_{\rm pf} = 1,$$

doit être voisine de la réalité.

Lorsque le fluide est un gaz, nous mettrons l'indice g à la place de f dans les équations (10) et (11) et nous admettrons que  $\frac{\overline{p}}{\rho_g}$  = constante. En ajoutant membre à membre les équations (10) et (11),

En ajoutant membre à membre les équations (10) et (11), nous obtenons:

$$\frac{\mathbf{q}_{\mathbf{s}}}{\mathbf{s}} \quad \frac{\mathbf{d}\mathbf{u}_{\mathbf{s}}}{\mathbf{d}\mathbf{x}} + \frac{\mathbf{q}_{\mathbf{g}}}{\mathbf{s}} \quad \frac{\mathbf{d}\mathbf{u}_{\mathbf{g}}}{\mathbf{d}\mathbf{x}} = -\frac{\mathbf{d}\bar{\mathbf{p}}}{\mathbf{d}\mathbf{x}} - g\left[\rho_{\mathbf{s}}\mathbf{o} + \rho_{\mathbf{g}}(1-\mathbf{o})\right] - \\ - \mathbf{o} - \frac{\mathbf{s}}{\mathbf{D}} \quad \frac{\mathbf{u}_{\mathbf{s}}^{2}}{\mathbf{s}^{2}} - (1-\mathbf{o}) \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{D}} \quad g \frac{\mathbf{u}_{\mathbf{g}}^{2}}{\mathbf{g}^{2}}$$
(12)

et en les retranchant membre à membre après les avoir divisées respectivement par c et 1 - c:

$$\rho_{\rm s} \, {\rm u}_{\rm s} \, \frac{{\rm d}{\rm u}_{\rm s}}{{\rm d}{\rm x}} - \rho_{\rm g} \, {\rm u}_{\rm g} \, \frac{{\rm d}{\rm u}_{\rm g}}{{\rm d}{\rm x}} =$$
(13)

$$= c_{D} \rho_{g} \frac{(u_{g} - u_{g})^{2}}{2} \frac{3}{2d} \frac{1}{1 - o} - g(\rho_{g} - \rho_{g}) - \frac{\Lambda_{g}}{D} \rho_{g} \frac{u_{g}^{2}}{2} + \frac{\Lambda_{g}}{D} \rho_{g} \frac{u_{g}^{2}}{2}.$$

 $\vec{p}$  étant fonction de x il n'est pas possible en toute rigueur d'observer un régime établi car  $\rho_g$  est fonction de x. Mais on peut toujours distinguer une région d'entrée où les termes des premiers membres des équations (12) et (13) sont prépondérants et où la structure de l'écoulement imposée à l'entrée du tube joue un rôle essentiel et un région de régime pseudo-établi où o varie lentement avec x et cù  $\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}}$  est pratiquement une constante sur une grande longueur du tube.

Si l'on considère la zone du conduit où le régime est établi u<sub>g</sub> et u<sub>g</sub> sont indépendants de x.

Dans ces conditions, et si les variations de pression et de température sont suffisamment faibles devant leurs valeurs moyennes correspondantes, on peut considérer  $\rho_g$ constant et donc  $u_g$  constant dans une section.

Par conséquent, il est possible de confondre les vitesses moyennes et les vitesses débitantes dans une section tant pour le gaz que pour les particules, et l'on écrira, dans le cas du conduit vertical, en régime pseudo-établi, les équations do conservation de la masse qui définissent les vitesses débitantes us et ug (voir annexe):

$$\operatorname{cu}_{s} \mathcal{S} \rho_{s} = \operatorname{cU}_{s} \mathcal{S} \rho_{s} = q_{s}, \qquad (14)$$

$$(1-o) \cup_{g} S \rho_{g} = (1-o) \cup_{g} S \rho_{g} = q_{g}$$
(15)

et les équations (12) et (13) deviennent:

$$-\frac{d\bar{p}}{dx} = \frac{q_s}{2} \frac{\Lambda_s}{2D} U_s + \frac{q_g}{S} \frac{\Lambda_g}{2D} U_g + \left[ \rho_s \circ + \rho_g(1-\circ) \right]_g \quad (16)$$

$$\frac{\Lambda_{\rm s}}{D} \, \rho_{\rm s} \, \frac{{\rm U}_{\rm s}^2}{2} - \frac{\Lambda_{\rm g}}{D} \, \rho_{\rm g} \, \frac{{\rm U}_{\rm g}^2}{2} = \frac{3{\rm C}_{\rm D}}{4{\rm d}} \, \rho_{\rm g} \, \frac{\left({\rm U}_{\rm g} - {\rm U}_{\rm s}\right)^2}{1 - {\rm o}} - {\rm g}(\rho_{\rm s} - \rho_{\rm g}). \tag{17}$$

Dans une expérience donnée où  $q_s$  et  $q_g$  sont connus, les seules grandeurs facilement mesurables sont  $\bar{p}$  et c.

2.1. Approche théorique Posons  $\frac{A_s}{D} e_s \frac{U^2}{2} = A, \qquad \frac{A_g}{D} e_g \frac{U_g^2}{2} = B$ 

et 
$$J = -\frac{d\bar{p}}{dx} - \left[\rho_{g}o + \rho_{g}(1-o)\right]g$$

les équations (16) et (17) s'écrivent:

$$Ac + B(1-c) = J$$
 (18)

$$A-B = \frac{3C_{\rm D}}{4d} \rho_{\rm g} \frac{(U_{\rm g}-U_{\rm g})^2}{1-o} - g (\rho_{\rm g}-\rho_{\rm g}).$$
(19)

On peut remarquer que si on mesure  $U_s$ , on déduit o à l'aide de l'équation (14), puis  $U_g$  à l'aide de l'équation (15).

De même, si on mesure o on peut déduire  $U_g$  et  $U_g$ . Connaissant  $U_g$ ,  $U_g$ , o et  $\frac{d\bar{p}}{dx}$  que l'on mesure, ile reste à déterminer trois inconnues au moyen des deux équations (18) et (19). Il faut donc introduire une hypothèse supplémentaire, d'origine expérimentale, pour calculer les trois inconnues A (ou  $\Lambda_g$ ), B (ou  $\Lambda_g$ ) et  $C_D$ .

Or même en admettant que A et B sont du même ordre de grandeur, l'équation (18) donne une très bonne approximation de B en écrivant  $B = \frac{J}{1-0}$  car o étant petit devant 1, Ao est petit devant B(1-o).

Si A est de l'ordre de B, l'équation (19) donne:

$$\frac{3C_{D}}{4d} \rho_{g} \frac{(U_{g} - U_{s})^{2}}{1 - 0} = g(\rho_{s} - \rho_{g})$$
(20)

et si A = 0, l'équation (19) s'écrit:

$$\frac{3C_{\rm D}}{4d} \rho_{\rm g} \frac{(U_{\rm g} - U_{\rm g})^2}{1 - 0} = g(\rho_{\rm g} - \rho_{\rm g}) - \frac{J}{1 - 0}.$$
 (21)

Mais l'expérience montre que  $\frac{J}{1-c}$  est toujours très petit devant  $g(\rho_g - \rho_g)$ , par conséquent les valeurs de  $C_D$ obtenues à partir des équations (20) et (21) sont très voisines et les conclusions tirées du calcul de  $C_D$  à partir de l, hypothèse A = 0 doivent être très valables.

Par contre les conclusions relatives aux variations de A en faisant A = 0, doivent être bonnes tant que les valeurs de c restent petites devant 1, mais elles sont peut-être à corriger pour des valeurs de c plus grandes. En fait, on a:

$$\frac{B}{A} = \frac{\Lambda_g}{\Lambda_g} \frac{\rho_g}{\rho_g} \left(\frac{U_g}{U_g}\right)^2.$$

Si on prend pour  $A_g$  la valeur correspondant à celle de l'écoulement monophasique c'est-à-dire  $A_g = 0,02$  et

$$\Lambda_{\rm g} = 10^{-4}, \quad \frac{\rho_{\rm g}}{\rho_{\rm g}} = 10^{-3}, \quad \frac{U_{\rm g}}{U_{\rm g}} = 2,$$

on obtient:

$$\frac{B}{A} = 0,8.$$

Pour o = 0,02, on a  $\frac{Ao}{B(1-o)} = 0,025$ .

En négligeant Ac devant B(1-c), on fait donc une erreur sur B de 2,5%.

Pour o = 0,15, valeur qui peut être considérée comme élevée,  $\Lambda_s = 10^{-l_4}$ ,  $\Lambda_g = 0,2$ , c'est-à-dire un coefficient dix fois plus élevé que celui correspondant à un écoulement monophasique, et toujours pour les mêmes valeurs de  $\frac{\rho_g}{\rho_s} = \frac{U_g}{U_s}$  on trouve:

$$\frac{B}{A} = 8 \quad \text{et} \quad \frac{Ao}{B(1-c)} = 0,022$$

l'erreur sur B est de 2,2% lorsqu'on néglige Ac.

Pour les mêmes valeurs de c,  $\Lambda_g$ ,  $\frac{\rho_g}{\rho_s}$ ,  $\frac{\overline{U}_g}{\overline{U}_s}$  mais avec  $\Lambda_g = 5.10^{-4}$ , l'erreur sur B n'est encore que de 11% et elle n'atteint 22% que si  $\Lambda_g = 10^{-3}$ .

En réalité, comme on a pu le voir au cours des essais, les valeurs obtenues pour les concentrations spatiales moyennes en volume c sont, en général, inférieures à 15% et pour la plupart comprises entre 1 et 10%. A noter que les concentrations moyennes de transport en masse sont élevées puisqu'elles se situent entre 10 et 50 kg de matière par kg d'air. D'autre part, avec les résultats expérimentaux dont on dispose, on peut remarquer qu'en adoptant pour  $\Lambda$  la valeur minimale, c'est-à-dire celle correspondant à l'écoulement du gaz seul,  $\Lambda_g$  reste toujours d'un ordre inférieur à celui de  $\Lambda_g$ .

Compte tenu des valeurs de concentration spatiale étudiées lors de nos travaux, on peut donc faire A = 0, ce qui revient à admettre que  $\Lambda$  est pratiquement nul, et considérer, dans le cas d'un écculement turbulent biphasique en conduit vertical ascendant et en régime pseudo-établi, un coefficient unique, que nous appellerons  $\Lambda_{--}$ , analogue au coefficient de frottement pour le gaz.

Le coefficient A englobe le coefficient moyen de frottement pour le gaz et le coefficient moyen de perte de quantité de mouvement par chocs des particules solides sur les parois. Ceci reste valable tant que les fluctations des différentes grandeurs locales restent petites devant leurs valeurs moyennes.

Dans ces conditions il est donc possible en mesurant  $\frac{dp}{dx}$ , la vitesse moyenne U<sub>s</sub> des particules ou la concentration spatiale moyenne c, de déterminer les deux inconnues  $\Lambda_{g}$  et C<sub>D</sub> à partir des équations (18) et (19) qui deviennent:

$$A_{g} = \frac{J}{1-0} \frac{2D}{\rho_{g} U_{g}^{2}}$$
 (22)

$$C_{\rm D} = \frac{4d(1-o)}{3 \rho_{\rm g} (U_{\rm g} - U_{\rm g})^2} \left[ g(\rho_{\rm g} - \rho_{\rm g}) - \frac{J}{1-o} \right].$$
(23)

A noter que J est déduit de la mesure de  $\frac{d\bar{p}}{dx}$  de laquelle on retranche le terme  $\left[\rho_{g} \circ + \rho_{g}(1-\sigma)\right] g$ , qui représente la pression hydrostatique dans le conduit vertical. 3. Étude expérimentale

3.1. Description de l'installation d'essai

L'installation d'essai a été prévue avec un conduit vertical ascendant suffisamment long de manière à pouvoir disposer d'une zone de mesure loin de toute singularité, en particulier du coude amont.

L'installation fonctionne par refoulement, c'est-à-dire que tous les éléments de l'installation se trouvent en pression par rapport à l'atmosphère, les appareils de réception se trouvant à la pression atmosphérique ou à une pression très voisine. Le dispositif d'introduction et de mise en vitesse du produit est par contre en pression; il est donc constitué d'un organe étanche.



Fig. 1. Installation d'essais

294

La figure 1 représente l'ensemble de l'installation expérimentale:

- (1) un compresseur à pistons secs pouvant fonctionner jusqu'à une pression relative de 7 bar.
- (2) un réservoir tampon,
- (3) une conduite d'air principale,
- (4) un régulateur de pression,
- (5) une tuyère interchangeable à col cylindrique fonctionnant en régime sonique,
- (6) une tuyauterie d'équilibrage aboutissant à la partie supérieure du réservoir d'expédition.
- (7) un diaphragme permettant de mesurer le débit d'air passant par le conduit (6),
- (8) un réservoir d'expédition pesé, d'un volume de 2 000 l et recevant la matière à transporter,
- (9) un conduit de transport interchangeable,
- (10) une vanne d'isolement,
- (11) un dispositif d'introduction des particules marquées,
- (12) un récepteur-séparateur air-matière,
- (13) un filtre à manches destiné à épurer l'air de tranport avant son rejet à l'atmosphère.

Le réservoir d'expédition (8), que est pesé, et isolé des tuyauteries rigides d'air et de transport au mocen d'éléments flexibles.

Trois conduits de transport différents ont été utilisés: D = 32 mm, 50 mm et 80 mm.

3.2. Caraotéristiques physiques des partioules solides utilisées lors des essais
- granulés de polyéthylène, forme cylindrique:

d moyen = 3,64 mm;  $\rho_s = 0,958 \text{ g/cm}^3$ 

- blé, forme allongée:

d moyen = 4,06 mm;  $\rho_s = 1,27 \text{ g/om}^3$ 

- sable extra silioeux:

d moyen = 0,105 mm;  $\rho_{\rm m}$  = 2,58 g/cm<sup>3</sup>

polyohlorure de winyle (PVC); d moyen = 0,100 mm; ρ<sub>g</sub> = 1,4 g/om<sup>3</sup>.
3.3. Dispositifs de mesure
3.3.1. Détermination du débitmasse de partioules

Le débit-masse moyen de transport que est déterminé, pour chaque essai, à l'aide d'un dispositif permettant une pesée continue du réservoir d'expédition (8). Le réservoir est suspendu par 3 tirants, disposés à 120°, lesquels comportent chacun sur leur fibre neutre une jauge extensométrique (fig. 2).



Fig. 2. Dispositif de pessée continue du réservoir d'expédition - Vue d'une jauge extensométrique placée sur la fibre neutre d'un tirant de suspension

Les 3 jauges sont reliées à un enregistreur à deux pistes permettant d'enregistrer simultanément et en continu la masse du réservoir et la pression dans ce dernier (fig. 3).

Afin d'obtenir un débit-matière régulier au oours d'un même essai, on maintient une pression constante au-dessus des particules et pour cela on alimente le réser-

296

voir, à sa partie supérieure, en air comprimé par l'intermédiaire de la tuyauterie d'équilibrage (6).



Fig. 3. Détermination du débit-masse de particules. -Enregistrement simultané et en continu de la variation de la masse du réservoir d'expédition et de la pression dans ce dernier



Fig. 4. Détermination du débit-masse de particules. Représentation d'un enregistrement d'un essai de transport de sable

La figure 4 donne la représentation d'un enregistrement d'un essai de transport de sable.

3.3.2. Détermination du débitmasse d'air



Fig. 5. Détermination du débit de gaz; tuyère à col sonique Le débit-masse d'air est mesuré au moyen d'une tuyère sonique (suivant le profil de la figure 5).

Dans tous les essais, nous avons travaillé en régime sonique.

A noter que le mode de fonctionnement retenu qui consiste à utiliser un réservoir d'expédition étanche par rapport à l'atmosphère durant la période de transport est particulièrement bien adapté pour la détermination du débit de gaz.

En effet, à l'aide de la tuyère sonique, on détermine avec une très bonne précision le débit-masse d'air total  $q_{g1}$  fourni par le compresseur, et tenant compte du débit-masse d'air  $q_{g2}$  nécessaire pour maintenir le réservoir d'ex-

pédition (8) à pression constante, on déduit le débitmasse d'air  $q_g$  effectivement utilisé pour le transport des particules solides dans le conduit (9). Le débit-masse d'air  $q_{g2}$  est calculé à partir du début-masse  $q_g$  de particules obtenu par pesée:

$$q_{g2} = \frac{q_{g2}}{\rho_{g2}} \rho_{g2}$$

où  $\rho_{g2}$  représente la masse volumique de l'air déterminée aux conditions régnant dans le réservoir d'expédition.

Le débit-masse d'air q<sub>g</sub> réellement utilisé pour le transport, avant la vidange complète du réservoir d'expédition est dono:

298

 $q_g = q_{g1} - q_{g2}$ 

3.3.3. Pertes de charge

Les pertes de pression correspondant à l'écoulement de la suspension dans le conduit sont relevées à l'aide de prises de pression statique reliées à des manomètres à eau ou à mercure (fig. 6).



Fig. 6. Tableau central de manomètres reliés aux prises de pression

Les mesures de la vitesse des particules et de la concentration spatiale moyenne dans une section sont effectuées dans une zone où le régime est établi.

On considère que l'on se trouve dans une telle zone lorsque le gradient de pression statique le long du conduit devient constant.

3.3.4. Mesure de la vitesse U des particules solides

3.3.4.1. Dispositif de mesure a l'aide de prises de vues au moyen d'une caméra.

Pour les grosses particules, granulés de polyéthylène et blé, on a mesuré directement la vitesse moyenne des particules.

La méthode consiste à introduire en cours de transport, dans l'écoulement biphasique, des particules teintées, ayant les mêmes caractéristiques physiques que celles des particules transportées.



L'introduction est réalisée dans le conduit vertical par l'intermédiaire du dispositif représenté sur la figure 7, qui évite toute entrée d'air dans le conduit.En aval de ce dispositif se trouve intercalé sur la conduite de transport un élément de tube transparent qui permet la réalisation de prises de vues de la suspension au moyen d'une caméra.

Une échelle graduée de 1 m de long, disposée sur le côté du conduit transparent, permet de déterminer la vitesse  $U_s$  des particules en projetant le film image par image et en suivant la progression d'un groupe de particules teintées. Pour chaque essai, on procède à 3 ou 4 introductions de particules, chaque groupe étant suivi le long de la règle graduée, sur 3 à 6 vues successives.  $U_s$  représente, pour chaque essai, la moyenne de plusieurs lectures.

Afin de ne pas perturber l'écoulement de la suspension, les particules teintées sont introduites en très faible quantité et les prises de vues sont réalisées dans la zone où le régime est établi.

3.3.4.2. Dispositif de mesure à l'aide de traceurs radio-actifs

Pour vérifier les résultats obtenus au moyen de cette méthode, on a procédé, au cours d'une quinzaine d'essais, à la mesure de la vitesse U<sub>s</sub> en utilisant simultanément la caméra pour filmer les particules teintées et des traceurs radio-actifs placés dans un cettain nombre de granulés.

La technique de marquage, mise au point par le C.E.A de Saclay, est particulièrement bien adaptée pour des particules de grosses dimensions. Elle consiste à insérer dans le granulé une petite source radio-active qui ne modifie pas sensiblement sa masse volumique, le radioélément étant constitué par un fil d'or 198 - période de 65 heures - d'une longueur de 1 mm et d'un diamètre de 0,1 mm.

Pour obtenir une bonne répartition des particules marquées tout au long de l'essai et éviter leur groupement, on les mélange aux grains inactifs stockés dans le réservoir d'expédition (8).



Fig. 9. Détecteur de particules radio-actives, placé sur le conduit de transport vertioal



Fig. 10. Détermination de 1a vitesse des particules comportant un radio-élément: visualisation des "pics" sur l'analyseur 800 canaux

présente la vitesse moyenne du granulé.

Le matériel de mesure comprend 3 déteoteurs (fig. 9) reliés à 3 intégrateurs (type SPP3-Saclay) disposés comme indiqué sur la fig. 8. les impulsions provenant de ces derniers étant dirigés vers un analyseur 800 canaux.divisé en deux fois 400 canaux (fig. 10). Une imprimante rapide permet d'enregistrer les valeurs des 400 canaux en 20 secondes.

déclenchement Le du balayage de l'analyseur est commandé par le granulé lui-même, lors de son passage devant le détecteur S1. Les détecteurs S2 et S3. disposés de part et d'autre de la caméra de prises de vues des partioules teintées, donnent le (emps + de parsours moyen du granulé radio-actif entre les deux 800tions S2 et S3 distantes de la longueur L. où le Étant donné que l'on se trouve dans une zone régime est pseudo-établi, on peut considérer que 🚣 reCependant le temps de séjour  $4_{t}$  pour un même essai, n'est pas le même pour toutes les particules radio-actives (fig. 11), celles-ci suivant chacune une trajectoire différente. Mais connaissant, pour un même essai, les vitesses individuelles de plusieurs particules, on peut admettre que la moyenne arithmétique de ces vitesses est égale à la vitesse moyenne  $U_{s}$  des granulés dans le conduit vertical.

La précision reste du même ordre de grandeur que celle obtenue avec le dispositif basé sur le principe des prises de vues. En effet, les résultats comparatifs (fig. 12) montrent qu'il y a une bonne concordance entre les deux réthodes. Le dispositif de prises de vues à l'aide de la caméra, a été utilisé pour l'ensemble des essais réalisés avec les grosses particules (granulés de polyéthylène et blé).



Fig. 12. Essais comparatifs: résultats obtenus au moyen des prises de vues des traceurs radioactifs

manipulations. En catre, son coût d'exploitation est plus onéreux que celui des prises de vues.

Ce système est particulièrement intéressant puisqu'il permet d'effectuer un grand nombre d'essais avec du matériel relativement simple.

L'uciliation des traceurs radio-actifs a l'avantage de faciliter les dépouillements mais nécessite par contre quelques précautions lors des



Fig. 11. Mesure de la vitesse U<sub>s</sub> des particules de polyéthylène au moyen de traceurs radio-actifs. Histogrammes des temps de séjour déterminés pour sept grains au cours d'un essai

3.3.5. Mesure de la concentration spatiale moyenne a<sub>x</sub>

Pour les petites particules, d'un diamètre moyen d de l'ordre de 0,1 mm, on ne peut plus utiliser pour la détermination de la vitesse U<sub>g</sub> les prises de vues ou les radio-éléments en raison de la dispersion très rapide des particules marquées.

En effet, les particules teintées ou radio-actives s'étalent sur une grande longueur dans l'écoulement biphasique, ce qui rend difficile le choix des "pics" sur l'enregistrement pour déterminer la vitesse moyenne.

Aussi on mesure, dans le cas des pulvérulents, directement la concentration spatiale moyenne c de la suspension dans une section droite du conduit où le regime est pseudo-établi.



Fig. 13. Mesure de la concentration spatiale dans une section droite d'un conduit vertical ascendant. -Vue de la source  $\beta$  et du détecteur Le dispositif utilisé a été également mis au point par le C.E.A. de Saclay. La mesure est basée sur l'atténuation du rayonnement émis par une source scellée de Strontium-/ttrium 90 (fig. 13).

Le principe de la mesure est le suivant: si de part et d'autre du conduit de transport, on dispose une source de rayons et un détecteur de radio-activité, l'activité mesurée par ce dernier est fonction de la concentration spatiale moyenne du mélange biphasique traversé par le faisceau.

Toutefois, l'étalonnage de l'appareil constitue le problème le plus délioat. En principe il devrait se faire à partir de suspensions relativement homogènes et stables des particules transportées, pour quelques valeurs connues de concentration spatiale.

Or, l'utilisation de telles suspensions est pratiquement impossible à réaliser. Aussi l'étalonnage est effectué avec des cylindres de polyuréthane expansé dont les masses volumiques varient de 0,0192 g/cm<sup>3</sup> à 0,1005 g/cm<sup>3</sup>. Les différents cylindres servant à l'étalonnage sont placés à l'intérieur d'une portion de conduit de dimensions identiques à celles du tube servant aux essais.

L'ensemble de mesure par absoption comprend (fig.14):

- une source de rayonnement,
- un détecteur,
- un système de comptage et d'enregistrement.

- Source de rayonnement

Lors de nos essais, nous avons utilisó le rayonnement /3 d'une source de Strontium - Yttrium 90,activité 1,06



mC. Ce rayonnement constitué en fait d'électrons, présente un coefficient d'absorption massique élevé ce qui explique le bon contrnste obtenu.

La matière radio-active est enfermée dans une capsule métallique en acier inoxydable et présente du côté du rayonnement une

Fig. 14. Dispositif de mesure de la concentration spatiale c au moyen de rayons  $\beta$ 

fenêtre mince d'acier de 10/100 de mm d'épaissour.

Il faut noter que l'utilisation d'une source  $\beta$  est particulièrement intéressante dans notre application étant donné que l'atténuation du rayonnement ne dépend pas du numéro atomique des matériaux servant à l'etalonnage et aux essais. - Le détecteur et la chaine de mesure

C'est une sonde  $\beta$ (type SBS.50 C.E.A. - Saclay). Le principe de fonctionnement est le suivant: un électron ayant traversé l'écran absorbant frappe la sonde sur sa partie avant. A cet emplacement



Fig. 15. Mesure de la concentration spatiale dans une section droite d'un conduit:enregistreur potentiométrique se trouve un sointillateur plastique qui transforme ces particules en photons. Ces photons attaquent ensuite un photo-multiplicateur et l'on sort finalement de la sonde une série d'impulsions qui pénètrent à leur tour dans un intégrateur.

- Système de comptage et d'enregistrement

L'intégrateur (type SPP3C.E.A. - Saclay) possède, entre autres, deux fonctions:

- mise en forme des impulsions avant leur comptage à l'aide d'une échelle. Cette information digitale permet de connaître la valeur moyenne de la concentration à l'aide d'une courbe d'étalonnage,
- intégration de l'information qui permet de la recueillir sous une forme analogique à l'aide d'un enregistreur potentiométrique (fig. 15).

Ces deux informations sont complémentaires, l'information analogique fournie par l'enregistreur rendant compte en particulier des variations instantanées de la masse volumique de la suspension, ce qui permet de pondérer les résultats obtenus par l'information digitale.

A titre d'exemple on a reproduit sur la figure 16 un enregistrement de la concentration spatiale o, pour une concentration moyenne de transport q = 28, 8.

Connaissant c, on déduit les vitesses  $U_g$  et  $U_g$  à partir des équations (14) et (15):

$$U = \frac{q_{g}}{cS\rho_{g}}$$
 et  $U_{g} = \frac{q_{g}}{(1-c)S\rho_{g}}$ 



Fig. 16

## 4. Analyse et interprétation des résultats

Les essais unt été effectués en faisant varier la concentration moyenne de transport q et la vitesse de transport ce qui a conduit à modifier  $q_e$  et  $q_a$ .

L'influence de la vitesse a été surtout étudiée pour les valeurs minimales. A noter qu'il est difficile de ne faire varier qu'un seul paramètre sans modifier la valeur des autres. En effet, pour un conduit donné, sil'on réduit par exemple uniquement le débit-masse d'air  $q_g$ , on modifie en même temps le débit-masse de particules solides  $q_g$  et la pression de fonctionnement, c'est-à-dire la masse volumique  $\rho_p$  de l'air.

Il est dono nécessaire de procéder à un grand nombre d'expériences de manière à pouvoir grouper les essais les plus voisins qui ne diffèrent que par un seul paramètre.

## 4.1. Produits granuleux

Pour les grosses particules, granulés de polyéthylène et blé, le rapport Us est de l'ordre de 0,4 à 0,7. Il dépend des caractéristiques physiques des particules. Le coefficient de trainée moyen C<sub>D</sub> a été déterminé à partir de l'équation (23).

Comme la vitesse U du gaz semble l'un des paramètres ayant une influence prépondérante, en particulier sur la vitesse des particules, nous avons exprimé les variations du coefficient de traînée moyen C<sub>D</sub> en fonction de la vitesse U du gaz, qui est prise comme grandeur de référence pour permettre une étude comparative.



Fig. 17

A titre d'exemple on a établi (fig. 17) la courbe  $C_{D^{\Xi}} \equiv f(U_{g})$  pour les granulés de polyéthylène.

A partir des résultats expérimentaux obtenus pour chacun des produits, nous avons établi les courbes  $C_{D}=f(U_{g})$ pour l'ensemble des essais.

On peut remarquer que toutes les courbes sont très proches les unes des autres et que les diamètres moyens d des particules de polyéthylène et de blé étant très voisine, tous les points d'essais se regroupent pratiquement sur une même courbe pour les 2 types de granulés (courbe II - fig. 18).



Fig. 18

La Dourbe I de la meme figure, représente les valeurs théoriques du coefficient de traînée D<sub>C</sub> déterminées pour une particule isolée d'un diamètre équivalent d égal à celui de la sphère de même volume.

Le nombre de Heyunolds relatif  $R_{g} = \rho_{g} \frac{wd}{\mu_{g}}$  correspon-

dant étant l'intervalle 500  $\leq R_s \leq 2.10^5$ , on obtient pour une sphère isolée un coefficient  $D_c = 0.44$ .

On remarque que pour  $U_g \ge 20$  m/s le coefficient de trainée est sensiblement le même que selui d'une sphère. Pour  $U_g \le 20$  m/s, le coefficient de trainée est par contre en peu plus important et se situe plus près de colui d'un cylindre.

Pour des valeurs du rapport des débits en masse q<30, on peut exprimer le coefficient A sous la forme A = = a + bq et le rapport  $\frac{J}{2p_g}$  sous la forme  $\frac{J}{2p_g}$  = 1 + eq.

A noter qu'en pratique dès que q est supérieur à quelques unités, a est négligeable devant bq, b et e étant fonction de  $\rho_s$  et des dimensions des particules.  $\Delta p_g$  est la valeur théorique de la perte de charge obtenue à partir de la relations:

$$\Delta p_g = A_g \frac{L}{D} \varphi_g \frac{v_g^2}{2}$$

Recherche experimentale...

dans laquelle  $A_g = 0.316 \text{ R}_g$  et  $V_g = q_g/S \rho_{gi}$  c'està-dire la vitesse du gaz en écoulement monophasique.

- 1











A titre d'exemple les figures 19 et 20 donnent respective ment la représentation des courbes  $A_{gv}$ = = f(q) et  $\frac{J}{Ap_g}$  = f(q)

pour des essai réalisés avec des granulés de polyéthylène.

Si l'on prend le rapport des débits en volume  $q = \frac{q}{q} \frac{s}{g}$  et que l'on étudie la fonction  $\Lambda_g = f(q_v)$ on constate qu'il y a un regroupement des résultats pour les 2 types de particules (fig. 21).

Le coefficient  $l_{gv}$ qui est sensiblement le même pour les 2 types de particules est une fonction croissante du rapport  $\frac{D}{d}$ .

Pour les valeurs q supérieures à 30 on remarque une augmentation assez forte du coefficient  $\Lambda_g$ 

311

### 4.2. Produits pulvérulents

Compte tenu des résultats obtenus lors des essais sur du sable, et à partir de la mesure de la concentration spatiale moyenne c, on constaté que pour les fines particules d'un diamètre moyen d de l'ordre de 0,1 mm, la vitesse de glissement est voisine de la vitesse de chute w d'une particule spérique isolée de même diamètre dans le fluide considéré comme immobile.

Cette vitesse reste du même ordre de grandeur lorsqu'on fait varier la vitesse  $U_g$  do gaz et semble ne pas dépendre de la valeur de la concentration spatiale c tant que c < 10%.

Il est donc possible d'admettre comme hypothèse U<sub>g</sub> = U<sub>s</sub> = pour les fines particules, sans que cela entraîne une erreur importante, la vitesse étant calculée à partir de la relation  $w^2 = \frac{4d}{3C_D}g \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}$ , dans laquelle C<sub>D</sub> est le coefficient de traînée des particules pour le nombre de Reynolds relatif R<sub>s</sub> =  $\rho_g \frac{wd}{\mu_s}$ .

Comme pour les produits granuleux, on peut exprimer le coefficient  $\Lambda_{gW}$ , pour q < 30, sous la forme  $\Lambda_g = a + bq$  et le rapport  $\frac{J}{dp_g}$  sous la forme

$$\frac{J}{Ap_g} = 1 + eq.$$

On remarque également que a devient négligeable devant bq, dès que q est supérieur à quelques unités, b et e étant fonction de s et des dimensions des particules.

Si l'on exprime  $A_{gv}$  en fonction du rapport des débits en volume  $q = \frac{q}{v_s}$  on obtient un regroupement des résultats pour les 2 types de particules (fig. 22).

312









Cependant la dispersion est plus grande que dans le cas des produits granuleux.

Pour des valeurs q > 30, on constate également une augmentation rapide du coefficient  $\Lambda_{gw}$ .

La longueur de référence à considérer dans le nombre de Froude semble être le diamètre D du conduit plutốt que le diamètre équivalent d des particules. On trouve en effet pour  $F = \frac{U_B}{(gD)^{0.5}}$ , des valeurs minimales du même ordre de grandeur pour le blé et le polychlorure de vinyle en poudre, alors que le rapport  $\frac{d_1}{d_2}$ des diamètres des particules est voisin de 40 et que  $\frac{\sqrt{Bd_1}}{\sqrt{gd_2}}$  est supérieur a 6.

Lorsque U<sub>g</sub> tend vers la vitesse minimale de transport,  $A_{gv}$  décroît en même temps que le nombre de Froude à concentration spatiale o constante (fig. 23).





J diminue lorsque F décroît à débit-masse q constant (fig. 24) mais il ne faut pas extrapoler les courbes vers les faibles valeurs de F, car J, et par conséquent  $\Lambda_{gv}$ , ne diminuent pas au-delà des limites indiquées. Au contraire, pour des valeurs F inférieures, il y a une brutale augmentation de la perte de pression qui se traduit par le dépôt de la matière dans la partie basse du conduit.

L'examen des [courbes donnant les variations de  $(\frac{J}{dp_g} -1)/c$  en fonction de  $\frac{gD}{U_g^2}$  (fig. 25) montre que la perte de pression décroît en même temps que le diamètre D du conduit à concentration spatiale moyenne c constante.



Fig. 25

En d'autres termes  $A_{gV}$  est une fonction croissante de  $\frac{D}{d}$ , ce que l'on a pu vérifier pour l'onsemble des essais effectués avec les produits granuleux et pulvérulents. Le coefficient  $\Lambda_g$  relatif aux fines particules (d--0,1 mm) est supérieur à celui correspondant aux granulés (d = 3 à 4 mm) à concentration q constante.

Ce coefficient olus important pour les produits de petites dimensions, peut s'expliquer par la présence d'un nombre plus important de particules dans la zone près de la paroi, ces particules jouant le rôle de rugosité.

On note également que  $\Lambda_{gv}$  est une fonction décroissante du rapport  $\frac{\rho_s}{\rho_g}$  pour des particules de nature différente mais de dimensions d égales ou très voisines. En effet on observe que, pour des valeurs q égales, le coefficient  $\Lambda_{gv}$  pour le sable est inférieur à celui relatif au polychlorure de vinyle. Ceci est dû au fait que pour une même valeur de q ou de c un élément de volume du conduit contient un plus grand nombre de particules lorsque leur masse volumique  $\rho_s$  est plus faible. Il doit en être de même dans la zone près de la paroi.

#### 5. Conclusion

En conduite verticale il est extrêmement important de connaître la concentration spatiale moyenne c, ou la vitesse moyenne U<sub>s</sub> des particules. En particulier, comme on a pu le constater au cours de nos essais, la pression hydrostatique, égale à  $g\left[\rho_{s}c + \rho_{g}(1-c)\right]$ , peut représenter une très grande parte de la perte de pression totale dans la conduite.

Pour savoir connaître les valeurs U<sub>s</sub> et c, il a été nécessaire de mettre au point des dispositifs de mesure convenant pour de fortes concentrations.

C'est ainsi que nous avons utilisé le système de prises de vues à l'aide d'une caméra, complété par l'emploi de radio-éléments, pour la mesure de la vitesse moyenne U<sub>s</sub> des grosses particules, et le dispositif basé sur l'atténuation d'un rayonnement émis par une source radio-active pour déterminer la concentration spatiale o dans le cas de fines particules. Ces dispositifs nous ont permis de réaliser des mesures avec une très bonne approximation pour des valeurs élevées du rapport débit-masse de particules au débitmasse du gaz. Il faut noter qu'au cours de cette recherche les essais ont été effectués pour des concentrations de transport q comprises entre 10 et 50 kg de matière par kg d'air, c'est-à-dire couvrant et dépassant même largement les concentrations, qui sont généralement utilisées en pratique industrielle.

D'autre part la connaissance de la concentration spatiale moyenne dans une section du conduit permet d'adopter un coefficient de perte de charge unique pour l'écoulement de la suspension. Généralement il est d'usage dans les écoulements biphasiques gaz-solide, de séparer la perte de charge totale due à la circulation de la suspension (pression hydrostatique déduite dans le cas de conduits verticaux ou inclinés), en perte de charge du gaz seul et en perte de charge résultant de la présence des particules: frottements entre particules et contre les parois, choos, etc. On considère dans ce cas que le coefficient de perte de charge du gaz seul est le même que celui correspondant à l'écoulement monophasique, et que le coefficient de perte de charge relatif aux particules est fonction des caractéristiques physiques de celles-ci.

Or si l'on examine les valeurs de la concentration spatiale moyenne en volume c dans une portion du circuit, on constate qu'elles sont le plus souvent très faibles et que par conséquent le nombre de particules venant en contact avec la parci, surtout en conduit vertical, n'est pas très important. En effet, pour q compris entre 10 et 50 kg de matière par kg d'air, c varie de 0,5 à 10% selon les caractéristiques physiques des particules.

En adoptant l'hypothèse qui consiste à séparer la perte de charge totale en deux fractions, et même en prenant dans le calcul de la perte de charge due au gaz, la valeur minimale pour le coefficient  $A_{\mu}$ , c'est-à-dire celle correspondant à un écoulement monophasique, le coefficient  $A_{\rm g}$ , relatif aux particules reste d'un ordre nettement inférieur.

En fait, dans un écoulement turbulent biphasique gazsolide, tant que l'on se trouve en phase diluée ou en phase de transition, avec une vitesse légèrement supérieure à la vitesse de dépôt, la présence des particules solides a pour effet d'augmenter la valeur du coefficient de perte de charge du gaz, les particules qui se trouvent près de la paroi jouant le rôle de rugosité.

C'est d'ailleurs dans cette zone qu'il faut maintenir une vitesse suffisante afin d'éviter des ralentissements trop importants en conduit vertical et des dépôts en conduit horizontal.

Le choix de la vitesse de transport est donc un élément extrêmement important. Une vitesse trop grande conduit à un accroissement de l'énergie consommée, à une usure accélérée du matériel et à une augmentation des dimensions des appareils, donc du coût de l'installation. Trop faible, elle se traduit par des fluctuations importantes de la pression et par un fonctionnement instable qui peut provoquer le bouchage des conduits.

C'est pour cette raison qu'il est indispensable de déterminer pour chaque produit, la vitesse minimale de transport et de choisir la concentration optimale afin de permettre la réalisation d'installations fonctionnant de façon stable, avec une puissance absorbée minimale.

Cette étude expérimentale a permis, dans un domaine extrêmement complexe, de mesurer directement avec une bonne précision, grâce aux dispositifs utilisés,les deux grandeurs essentielles: vitesse de transport et concentration spatiale.

L'importance de ces grandeurs avait été mise en évidence par les Établissements Neu dans les années 20, lors des premières recherches relatives à l'analyse de la perte de charge de grains de blé en suspension dans un écoulement d'air.

#### ANNEXE

### RAPPELS THÉORIQUES

Extrait de l'étude du professeur A. Fortier relative a l'écoulement turbulent stationnaire biphasique fluidesolide dans un tube cylindrique a forte concentration massique

(Réf. bibl. I et II)

Relations de définition:

$$(1) \iint_{\mathbf{s}} \rho_{\mathbf{s}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{s}} \ \overline{\mathbf{U}}_{\mathbf{s}} \ d\mathbf{\sigma} = \mathbf{c} \ \mathbf{u}_{\mathbf{s}} \ S\rho_{\mathbf{s}} = \mathbf{q}_{\mathbf{s}},$$

$$(2) \iint_{\mathbf{s}} \rho_{\mathbf{f}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{f}} \ \overline{\mathbf{U}}_{\mathbf{f}} \ d\mathbf{\sigma} = (1-\mathbf{c})\mathbf{u}_{\mathbf{f}} S\rho_{\mathbf{f}} = \mathbf{q}_{\mathbf{f}},$$

$$(3) \iint_{\mathbf{s}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{s}} \ \rho_{\mathbf{s}} \ \overline{\mathbf{U}}_{\mathbf{s}}^{2} \ d\mathbf{\sigma} = \beta_{\mathbf{s}} \ \mathbf{o} \ \rho_{\mathbf{s}} \ \mathbf{u}_{\mathbf{s}}^{2} \ S,$$

$$(4) \iint_{\mathbf{s}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{f}} \ \rho_{\mathbf{f}} \ \overline{\mathbf{U}}_{\mathbf{f}}^{2} \ d\mathbf{\sigma} = \beta_{\mathbf{f}} \ \mathbf{o} \ \rho_{\mathbf{f}} \ \mathbf{u}_{\mathbf{f}}^{2} \ S,$$

$$(5) \iint_{\mathbf{s}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{s}} \ \frac{\partial \overline{\mathbf{p}}}{\partial \mathbf{x}} \ d\mathbf{\sigma} = \beta_{\mathbf{ps}} \ \mathbf{o} \ \frac{d\overline{\mathbf{p}}}{d\mathbf{x}} \ S,$$

$$(6) \iint_{\mathbf{s}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{f}} \ \frac{\partial \overline{\mathbf{p}}}{\partial \mathbf{x}} \ d\mathbf{\sigma} = \beta_{\mathbf{pf}} \ (1-\mathbf{o}) \ \frac{d\overline{\mathbf{p}}}{d\mathbf{x}} \ S,$$

$$(7) \int_{\mathbf{o}} \ \overline{\alpha}_{\mathbf{s}} \ \overline{\mathbf{f}}_{\mathbf{ts}} \ d\mathbf{S} = - \ \mathbf{o} \ \frac{A_{\mathbf{s}}}{4} \ x \ \rho_{\mathbf{s}} \ \frac{u_{\mathbf{s}}^{2}}{2},$$

$$(8) \int_{\mathbf{o}} \ \overline{\mathbf{d}}_{\mathbf{f}} \ \overline{\mathbf{f}}_{\mathbf{tf}} \ d\mathbf{S} = - \ (1-\mathbf{c}) \ \frac{A_{\mathbf{f}}}{4} \ x \ \rho_{\mathbf{f}} \ \frac{u_{\mathbf{f}}^{2}}{2},$$

$$(9) \ \overline{\mathbf{f}} = S \ \mathbf{c} \ C_{\mathbf{D}} \ \rho_{\mathbf{f}} \ \frac{(u_{\mathbf{f}} - u_{\mathbf{s}})^{2}}{2} \ \frac{3}{2\mathbf{d}}.$$

f est la moyenne de la somme des projections sur la direction des génératrices des forces exercées par le fluide sur les particules dans une unité de longueur du conduit.

Dans les relations (7) et (8) X désigne la longueur du périmètre de la section S et d désigne dans la relation (9) un diamètre moyen des particules solides. Les relations (1) et (2) définissent les vitesses débitantes  $u_s$  et  $u_f$ ; les relations (3) et (4) définissent des coefficients de quantité de mouvement  $\beta_s$  et  $\beta_f$ , les relations (5) et (6) des coefficients de répartition de pression, p désignant la pression moyenne-mesurée en un point du périmètre de la section S; les relations (7) et (8) définissent des coefficients de frottement  $\frac{A_s}{-4}$  et  $\frac{A_f}{-4}$  pour le solide et pour le fluide et enfin la relation (9) définit un coefficient de traînée moyen  $C_D$  des particules.

Les relations (1) à (9) contiennent toutes la concentration spatiale moyenne c,  $\overline{\alpha}_{s}$  étant le taux de présence moyen, en un point de position définde par rapport aux frontières et à un instant t donné, du solide.  $\overline{\alpha}_{f}$ désigne dans les mêmes conditions le taux de présence moyen du fluide en ce point. D'après ces définitions on a donc en moyenne  $\overline{\alpha}_{f} = 1 - \overline{\alpha}_{s}$ .

#### BIBLIOGRAPHIE

- Fortier A.: "Mécanique des suspensions". Éd. Masson et Cie, Paris, 1967.
- Fortier A. et Chen C.P.: "Écoulement turbulent stationnaire biphasique air-solide dans un tube cylindrique à forte concentration massique". Journal de Mécanique, Vol. 15, nº 1, 1976.
- 3. Hours R.: "Mesure de vitesses des particules solides fluidisées dans un transport pneumatique au moyen de traceurs radio-actifs". Note technique DR-TAAR/RH-FM n 595. C.E.A. Saclay, décembre 1973.
- 4. Jodłowski C., Fortier A., Chen C.P.: "Études des vitesses d'écoulement des produits sclides en vrac dans les conduites d'installation de transport pneumatique". Compte rendu de fin de contrat DGRST.Comité Mécanique n 72-7-0185-00221-75-01.
- 5. Jodłowski C.: "Study of minimum transport velocities for upward flow in vertical pipes". Pneumotransport 3. Third international conference 7th-95h april 1976. University of Bath, England. BHRA-Cranfiel, Bedford, England.

BADANIE ESKPERYMENTALNE MINIMALNYCH SZYBKOSCI TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO MATERIALOW SYPKICH W PIONOWYM PRZEWODZIE

Streszozenie

Badanie opierają się na teorii prof. A. Fortiera, dotyczącej burzliwego przepływu stacjonarnego dwufazowego ciecz-stałe w rurze cylindrycznej.

Prace obejmują badania optymalnych wartości prędkości transportu i koncentracji odpowiadającej stratom minimalnych ciśnień przepływu dwufazowego w cylindrycznym pionowym przewodzie wznoszącym.

Próby zostały wykonane ze stężonymi masowymi koncentraojami (od 10 do 50 kg materiałów na kg powietrza) z materiałami ziarnistymi i sproszkowanymi i z przewodami o różnych średnicach.

Różne pomiary miały głównie na celu określenie średnicy szybkości stałych cząstek, jak również średnią koncentrację przestrzenną w jednym przekroju. Dla dużych cząstek (ziarna polietylenu i zboża) o średniej średnicy od 3,6 do 4 mm dokonano pomiaru prędkości cząstek za pomocą dwóch metod:

- zdjęcia za pomocą kamery filmującej cząstki zabarwione, wprowadzone do przewodu w czasie transportu,
- używając znaozników radio-aktywnych wprowadzonych do pewnej ilości ziaren.

Dla drobnych cząstek (piasek i polichlorek winylu PCW w proszku o średnicy ok. 0,100 mm) dokonano pomiaru koncentracji objętościowej w przekroju poprzecznym przewodu.

Ten pomiar jest oparty na oslabieniu promieniowania nadawanego przez źródło radioaktywne.

Rezultaty tych prób wykazują wpływ różnych liczb bezwymiarowych na:

- stosunek gęstości stałych cząstek i gazu,
- stosunek średnich średnic przewodu transportowego i ozęstek.

- średnia koncentracja transportu,
- średnia koncentracja objętościowa w przekroju przewodu,
- liczbą Froude'a.

Badania wykazują, że jest możliwym zmierzyć albo prędkość cząstek, albo średnią koncentrację objętościową w przekroju przewodu rury transportowej. Bardzo ważne są te wartości, ponieważ w przewodzie pionowym wznoszącym ciśnienie hydrostatyczne może odgrywać bardzo dużą rolę w stracie całkowitego ciśnienia.

исследование минимальной скорости транспорта твёрдых свободных продуктов в проводах инсталяции пневматического транспорта. применение к течению турбодентному двухфазному в вертикальном всходящем проводе

#### Резюме

Иссделования базируют на теории профессора Форте относящейся к стационарному турболентному течению твёрдого тела в цилиндрической трубке.

Работы базируют на исследовании оптимальных величин скоростей транспорта и концентрации соответствующей потерям минимального давления двухфазного течения в цилиидрическом всходящем проводе.

Для большой концентрации массовой /с 10 по 50 кг матернала на кг воздуха/ с продуктами гранулированными и порошкообразными и на разных диаметрах провода.

Разные измерения состояли главным образом из определения средней скорости молекул и на средней пространствениой концентрации в сечении. Для больших молекул /гранулированный полиэтилен и зёрно со средним диаметром при-

## Recherche expérimentale...

близительно 4 мм/ было выполнено измерение скорости молекул при помощи двух методов:

- киносъёмки при помощи камеры снимающей цветные молекулы введённые в вертикальный провод во время траиспорта.
- применения радиоактивных индикаторов в каком-то числе зерён.

Для маленьких молекул — песка и порошкообразного полихдорида со средним диаметром приблизительно 0,100 мм /сделано изменение средней концентрации на феномене ослабления радиации эмитированной радиоактивным источником.

Результаты исследований допускают элиминацию разных параметров без следующих величин:

- соотношение масс кубических твёрдого тела и газа,
- соотношение средних диаметров транспортного провода и молекул,
- средней концентрации транспорта,
- средней концентрации пространственной в простом сечении провода,
- числа Фруда.

Эти работы показывают, что можно измерить среднюю скорость молекул или среднюю концентрацию простраиственную в простом сечении транспортной трубки. Фактически изучение этих величин представляет собой большой интерес, потому что гидравлическое давление в вертикальном гидравлическом проводе может оказаться частью потери целого давления. INVESTIGATION OF THE MINIMAL SPEED OF THE SOLID PRODUCTS LOOSELY PLACED IN THE TUBES OF THE PNEUMATIC TRANSPORT INSTALLATION. APPLICATION FOR TURBULENT BI-PHASE FLOW IN THE ASCENDING VERTICAL TUBE

#### Summary

The investigations are based on the theory of professor A. Fortier refered to stationary turbulent bi-phase flow of the solid body into cylindrical tube.

The works are based on the value investigation of the optimal transport speeds and on the concentrations appropriate to losses of the minimal bi-phase flow pressure in the cylindrical ascending vertical conduit.

The surveys have been performed for the great mass concentration (from 10 to 50 kg material for 1 kg air) with granulated and powdered products and for different diameters of the conduit. Various measurements were generally based on the determination of the mean particles speed and on the mean spatial concentration in the section. For the great particles (granulated of the polyethylene and the grain having the mean diameter ca 3,6 and 4 mm) the measurement has been carried out by means of the two methods:

- film by means of the camera filming coloured particles entered into the vertical conduit during the transport,
- application of the radioactive indicators placed into the given quantities of the grains.

For fine particles (sand and powdered polychloride, vinyle, having the mean diameter about 0,100 mm) the mean spatial concentration measurement has been carried out. This measurement has been based on the phenomenon of the attenuation of the radiation emitted by the radioactive source.

324

The results of the investigations allow to remove the different parameter influence without following dimensions: - ratio of the volumetric masses of the solid body and the gas,

- ratio of the mean transport conduit and particle diameters,
  mean transport concentration,
- mean spatial concentration in direct section of the tube.
- Foudres number.

As a matter of fact, it is a very important problem to study those values because hydrostatic pressure can be the very important part of the total pressure losses in the vertical ascending conduit.